

УДК 621.314.2

М.И. Петров

РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С СИНУСОИДАЛЬНОЙ ВОЛЬТОДОБАВКОЙ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Рассматривается работа регулятора переменного напряжения (РПН) с синусоидальной вольтодобавкой. Предлагается подход к расчету коэффициентов трансформации трансформатора РПН с вольтодобавкой с учетом его применения в различных областях. Предлагаемый подход реализует заданную, соответствующую необходимым требованиям, регулировочную характеристику РП. Для расчета коэффициентов трансформации предлагается использовать математический пакет *Mathcad*.

Ключевые слова: вольтодобавка, коэффициент трансформации, регулирование напряжения, регулировочная характеристика, регулятор переменного напряжения, стабилизация напряжения.

1. Введение

В настоящее время требования регулирования уровня переменного напряжения наблюдается в различных областях промышленного и бытового сектора. В первую очередь, это обусловлено тем, что регулирование уровня напряжения позволяет оптимизировать ряд технологических процессов, повысить их энергоэффективность, увеличить срок службы исполнительных механизмов. Задачи регулирования напряжения актуальны в электрических сетях сельской местности, в дуговой сталелитейной плавке, при пуске асинхронных электродвигателей и т.д.

Одна из наиболее актуальных технологий для реализации данных задач основана на применении регуляторов переменного напряжения (РПН) с вольтодобавкой. Использование таких устройств позволяет обеспечивать требуемые уровни напряжения на нагрузке. Основным элементом РПН с вольтодобавкой является вольтодобавочный трансформатор (ВДТ), одна из обмоток которого включается последовательно с источником питания и нагрузкой. Регулирование уровня напряжения вольтодобавки возможно реализовать за счет применения различных подходов, одним из которых является управление величиной коэффициента трансформации

ВДТ. Применение такого способа регулирования напряжения определяет основное преимущество РПН, построенных по такой технологии – синусоидальность напряжения на нагрузке.

Анализ существующей литературы указывает на отсутствие единого подхода к расчету коэффициентов трансформации ВДТ, ведущего к реализации требуемой регулировочной характеристике РПН. В целом наличие такого подхода способствует проведению требуемых технологических процессов в различных областях применения РПН. В статье показано, что в зависимости от требуемой функциональной особенности РПН метод расчета коэффициентов трансформации вольтодобавочного напряжения будет различен.

Целью статьи является анализ подходов к реализации регулируемого коэффициента трансформации трансформатора РПН с синусоидальной вольтодобавкой. Достижение данной цели обеспечивается за счет исследования подходов, ведущих к реализации управления коэффициентом трансформации, разработки методики расчета параметров трансформатора для обеспечения заданного шага регулирования в различных областях применения РПН, анализа влияния параметров трансформатора на регулировочную характеристику РПН.

II. Применение регуляторов переменного напряжения с вольтодобавкой для управления уровнем напряжения на нагрузке

Основным блоком РПН с вольтодобавкой (рис. 1), который обеспечивает изменение уровня напряжения на нагрузке, является трансформатор с регулируемым коэффициентом трансформации [1].

Одним из подходов, ведущих к реализации регулируемого трансформатора (РТ), является применение трансформатора, одна из обмоток которого секционирована [2]. Регулирование коэффициента трансформации достигается за счет включения различных комбинаций последовательного соединения секций секционированной относительно друг друга. При этом каждая секция секционированной обмотки трансформатора в данном последовательном соединении может быть включена согласно или встречно относительно другой секции или может быть вообще не включена в соединение. Для переключения секций секционированной обмотки в различные состояния применяют коммутатор, управление которым обеспечивает реализацию различных комбинаций последовательного включения секций [3].

Основные соотношения, описывающие работу РПН:

$$U_{\text{н}} = U_{\text{с}} \pm U_{\text{вд}} \quad (1)$$

$$U_{\text{вд}} = U_{\text{ш}} / K_{\text{тр}} \quad (2)$$

где $K_{тр}$ – коэффициент трансформации РТ; U_c – входное напряжение РПН; $U_{ш}$ – напряжение на входе РТ (на рис. 1 это входное напряжение РПН); $U_{вд}$ – напряжение на выходе РТ (напряжение вольтодобавки).

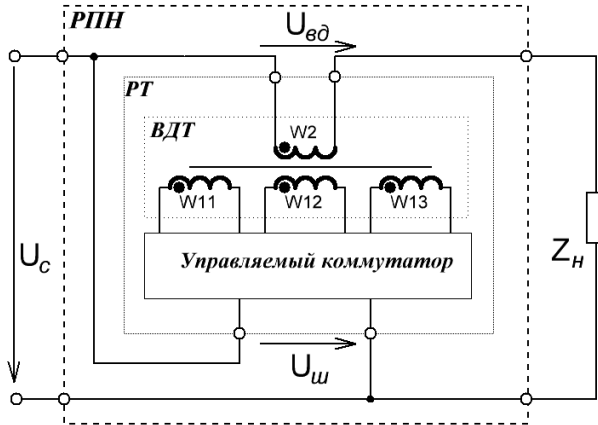


Рис. 1. Регулятор переменного напряжения с вольтодобавкой.

РПН – регулятор переменного напряжения с вольтодобавкой,
 РТ – регулируемый трансформатор, ВДТ – вольтодобавочный трансформатор,
 Управляемый коммутатор – набор управляемых ключей, соединенных
 между собой и с ВДТ определенным образом; W_2 – серийная обмотка ВДТ;
 W_{1i} – шунтовая обмотка ВДТ, с секциями W_{11} , W_{12} , W_{13} ;
 Z_H – сопротивление нагрузке РПН

III. Управление коэффициентом трансформации РТ

Коэффициент трансформации секции обмотки с номером i :

$$K_{тp i} = W_{1i} / W_2 \quad (3)$$

где W_{1i} – число витков i -ой секции шунтовой обмотки; W_2 – число витков серийной обмотки.

Характер включения i -ой секции шунтовой обмотки трансформатора в последовательном соединении секций можно задать функцией:

$$f_i = \{0; -1; 1\} \quad (4)$$

где «0» – i -я секция обмотки не включена в соединение; «-1» – i -я секция обмотки трансформатора включена согласно с другой обмоткой трансформатора; «1» – i -я секция обмотки включена встречно с другой обмоткой трансформатора.

Коэффициент трансформации РТ при различном включении секций обмотки:

$$K_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot K_{\text{тp}i} \quad (5)$$

где n – количество секций шунтовой обмотки.

Знак результата выражения (5) показывает знак вольтодобавочного напряжения.

Наличие трех различных вариантов подключения секции обмотки в последовательном соединении показывает, что для n секций обмотки количество возможных комбинаций включения секций и, следовательно, возможных значений коэффициента трансформации РТ составляет 3^n .

Регулирование уровня напряжения при использовании трансформатора с секционированной обмоткой происходит ступенчато. Одним из основных показателей при таком способе регулирования является возможность обеспечения равномерного распределения уровней вольтодобавочного напряжения. Это достигается соответствующим расчетом коэффициентов трансформации каждой секции секционированной обмотки [4].

Для расчета коэффициентов трансформации секций обмотки прием допущение, по которому сумма отклонений вольтодобавочного напряжения, полученного для рассчитываемых коэффициентов трансформации, от идеального распределения вольтодобавочного напряжения с равным шагом регулирования минимальна. Под идеальным распределением понимается такое распределение, при котором при заданном количестве различных комбинаций последовательного соединения секций секционированной обмотки шаг регулирования вольтодобавочного напряжения имел бы одно значение. Однако, ввиду частого участия в формировании вольтодобавочного напряжения одних и тех же секций секционированной обмотки идеального распределения добиться нельзя.

Решение задачи расчета коэффициентов трансформации секций секционированной обмотки можно получить при использовании математического пакета *Mathcad*. Блок *Given – Minerr* позволяет найти приближенное решение алгебраических уравнений [5]. Система решения алгебраических уравнений на основе блока *Given – Minerr*:

$$\left\{ \begin{array}{l} \textit{Given} \\ K_{\text{тp}i} = U_{\text{ш}} / D \cdot i; \\ K_{\text{тp}(i+1)} = U_{\text{ш}} / D \cdot (i + 1); \\ K_{\text{тp}(3^n)} = U_{\text{ш}} / D \cdot 3^n; \\ \textit{Minerr}(K_{\text{тp}}), \end{array} \right. \quad (6)$$

где $U_{\text{ш}}$ – напряжение на входе РТ; D – шаг регулирования; i – номер комбинации; n – количество секций обмотки.

При расчете коэффициентов трансформации с использованием блока *Given – Minerr* требуется придерживаться следующей последовательности действий. Во-первых, необходимо указать начальные приближения коэффициентов трансформации секций обмотки и шаг регулирования напряжения. Во-вторых, следует в теле блока прописать комбинации включения секций обмотки, которые должны обеспечивать требуемое значение вольтодобавки. На основе начальных приближений нужно указать соответствие различных коэффициентов трансформации РТ с уровнями вольтодобавочного напряжения, так чтобы минимальному значению вольтодобавки соответствовало максимальное значение коэффициента трансформации РТ, а максимальному значению вольтодобавки – минимальное значение коэффициента трансформации. Разность вольтодобавочного напряжения соседних уровней должна соответствовать шагу регулирования. Количество уравниваний, указанных в блоке, соответствует количеству возможных комбинаций включения обмоток.

Для поиска коэффициентов трансформации секций секционированной обмотки в теле блока *Given – Minerr* необходимо указать комбинации, при которых коэффициент трансформации трансформатора принимает либо положительные значения, либо отрицательные значения, в противном случае результат расчета будет неверен.

IV. Результаты

На рис. 2 показано идеальное и рассчитанное распределение уровней вольтодобавочного напряжения для всех комбинаций включения секций обмотки. Рассчитанное распределение получено для следующих параметров: количество секций обмотки – 3, напряжение на обмотке – 220 В, требуемый шаг регулирования – 3 В, диапазон регулирования – 0-39 В. Получено: коэффициенты трансформации секций – $K_{\text{тр}1} = 5,035$, $K_{\text{тр}2} = 10,12$, $K_{\text{тр}3} = 21,89$, максимальный и минимальный шаг регулирования – 17 В, 0,016 В, диапазон регулирования – 0-43,7 В.

На рис. 2 показано распределение только для положительного знака вольтодобавки, для отрицательного оно будет идентичное, но с другим знаком. Как видно, отклонение рассчитанного распределения вольтодобавочного напряжения от идеального распределения существенное, максимальный шаг между уровнями более чем в 5 раз больше шага регулирования, а минимальный шаг между уровнями меньше шага регулирования в 187 раз. Наличие трех секций обмотки показывает, что одна секция обмотки участвует в формировании 18 различных комбинациях включения, то есть в 18 различных $K_{\text{тр}}$.

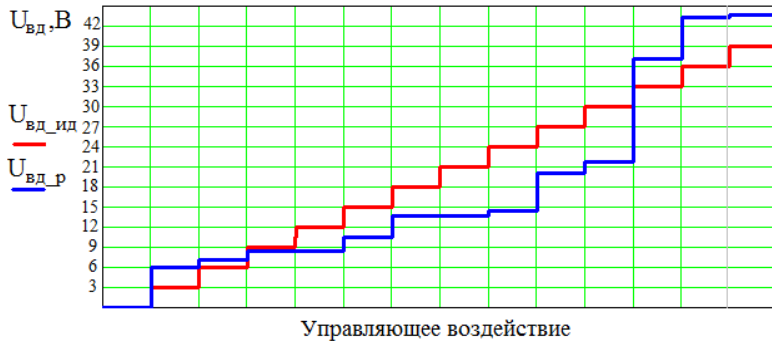


Рис. 2. Идеальное ($U_{вд_ид}$) и рассчитанное ($U_{вд_р}$) распределение уровней вольтодобавочного напряжения всех комбинаций трех секций обмотки

Поэтому блок *Given – Minerr*, учитывая все комбинации включения секций обмотки для обеспечения минимальной суммы отклонения от идеального распределения, выдает результат, при котором появляется существенная разница между минимальным и максимальным шагом регулирования. Одним из способов, способствующих уменьшению этой разницы, является снижение вовлеченности секции обмотки в формировании различных комбинаций включения секций. Это можно решить, например, исключением таких комбинаций, в которых присутствует встречное и согласное включение секций. Число комбинаций, удовлетворяющих этим требованиям, составляет $2^{n+1}-1$, а число комбинаций в которых участвует одна секция обмотки равно 2^n , что примерно составляет 50 % от общего числа комбинаций, поэтому в этом случае вовлеченность секции на 33 % меньше относительно вовлеченности секции при распределении всех возможных комбинаций.

Уменьшение числа комбинаций включения секций обмоток с сохранением диапазона регулирования увеличивает шаг регулирования, что необходимо учитывать при расчете системы (6).

На рис. 3 показано рассчитанное и идеальное распределение уровней вольтодобавочного напряжения для одноплюсного включения секций обмотки и для всех комбинаций включения секций обмотки соответственно. Рассчитанное распределение получено для следующих параметров: количество секций обмотки – 3, напряжение на обмотке – 220 В, шаг регулирования – 5,57 В, диапазон регулирования – 0-39 В. Получено: коэффициенты трансформации секций – $K_{тр1} = 5,55$, $K_{тр2} = 6,58$, $K_{тр3} = 8,39$, максимальный и минимальный шаг регулирования – 10,72 В, 6,2 В, диапазон регулирования – 0-39,6 В.

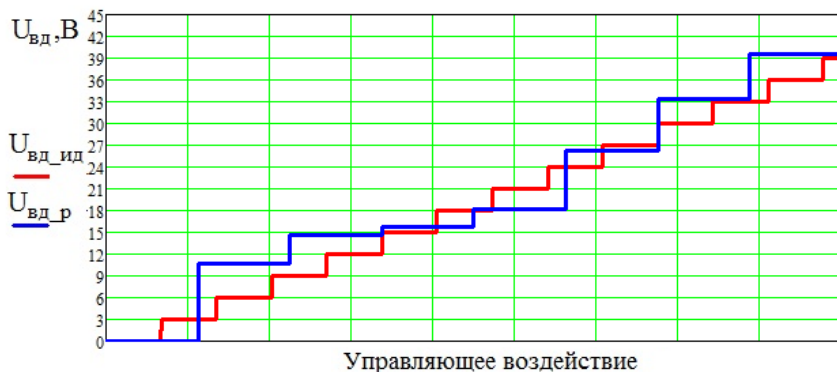


Рис. 3. Распределение уровней вольтодобавочного напряжения для трех секций обмотки при однотипном включении секций обмотки ($U_{вд_р}$) и идеальное распределение для всех комбинаций включения секций ($U_{вд_ид}$)

На рис. 3 показано только распределение для положительного знака вольтодобавки, для отрицательного оно будет идентичное, но с другим знаком. Видно, что отклонение рассчитанного распределения вольтодобавочного напряжения от идеального распределения снизилось, относительного распределения, учитывающего все комбинации включения секций. Кроме того, диапазон регулирования, обеспечиваемый полученными коэффициентами трансформации секций, приблизился к идеальному. Максимальный шаг и минимальный шаг регулирования между уровнями соответственно в 3,5 и 2,07 раза больше шага регулирования для идеального распределения, который составляет 3 В.

Как видно, распределение уровней вольтодобавочного напряжения путем исключения различных комбинаций включения секций обмоток из формирования вольтодобавочного напряжения становится равномернее относительно распределения с учетом всех комбинаций включения секций обмоток, но это достигается за счет уменьшения количества различных уровней регулирования. Поэтому использование такого способа актуально в областях, где равномерность шага регулирования основное требование.

V. Обсуждение результатов

В функции РПН помимо задач регулирования напряжения входят задачи обеспечения стабилизированного уровня напряжения на нагрузке [4]. Представленный выше подход к расчету коэффициентов трансформации секций обмотки возможно применить только для решения задач регулирования, так как в нем не учитывается изменение уровня входного напряжения РПН. Для расчета коэффициентов трансформации секций об-

мотки для РПН с функцией стабилизации выходного напряжения уравнения системы (6) необходимо изменить.

Так, для регуляторов переменного напряжения, повышающих напряжение на нагрузке:

$$K_{\text{три}} = U_{\text{н.ном}} + D \cdot i / D \cdot i, \quad (7)$$

где $U_{\text{н.ном}}$ – требуемый уровень напряжение на нагрузке при колебаниях входного напряжения РПН

Для регуляторов переменного напряжения, понижающих напряжение на нагрузке:

$$K_{\text{три}} = U_{\text{н.ном}} - D \cdot i / D \cdot i, \quad (8)$$

Таким образом, использование трансформатора с секционированными обмотками решают задачи регулирования напряжения и применение малого количества секций обмоток обеспечивает большое количество уровней регулирования.

VI. Заключение

Предложен подход к расчету параметров ВДТ для обеспечения заданного шага регулирования напряжения вольтодобавки и заданного распределения уровней вольтодобавочного напряжения при использовании различных функциональных особенностей РПН с вольтодобавкой.

© Петров М.И., 2020

Библиографический список

- [1] Panfilov D.I., Petrov M.I., Astashev M.G. Analysis of voltage regulators with boost voltage // 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), June 11-14, 2019, Genova, Italy. Pp. 1-6.
- [2] Thompson R. A thyristor alternating-voltage regulator // IEEE Transactions on Industry and General Applications. 1968. № IGA-4 (2). С. 162-168.
- [3] Миловзоров В.П., Мусолин Л.К. Дискретные стабилизаторы и формирователи напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
- [4] Петров М.И., Рашитов П.А., Панфилов Д.И. Расчет коэффициентов трансформации тиристорного регулятора переменного напряжения для различных областей его применения // Четырнадцатая всерос. (межд.) науч.-техн. конф. «Электроэнергетика. Энергия-2019», Апрель 2-4, 2019, Иваново, Россия. Иваново: ИГЭУ, 2019. Т. 3. С. 30.
- [5] Амосова О.А., Вестфальский А.Е. Применение пакета Mathcad к решению вычислительных задач. М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 30 с.

M.I. Petrov

REGULATION OF TRANSFORMATION RATIO OF TRANSFORMER OF AC VOLTAGE REGULATOR WITH SINUSOIDAL BOOST VOLTAGE

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Moscow, Russia

Abstract. The operation of an AC voltage regulator with a sinusoidal boost voltage is considered. An approach to calculate the transformation ratio of AC voltage regulator transformer is proposed. The proposed approach is lead to calculate necessary regulation characteristic. The Mathcad is proposed as a tool for calculating transformation ratios.

Keywords: AC voltage regulator, boost voltage, regulation characteristic, transformation ratio, voltage regulation, voltage stabilization.

References

- [1] D.I. Panfilov, M.I. Petrov and M.G. Astashev, “Analysis of voltage regulators with boost voltage”, in proc. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, June 11-14, 2019, Genova, Italy, pp. 1-6.
- [2] R. Thompson, “A thyristor alternating-voltage regulator”, *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, vol. IGA-4, is. 2, pp.162-168, March 1968.
- [3] V.P. Milovzorov and L.K. Musolin, *Diskretnye stabilizatory i formirovateli napryazheniya [Discrete stabilizers and voltage shapers]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian)
- [4] M.I. Petrov, P.A. Rashitov and D.I. Panfilov, “Calculation of transformation coefficients of a thyristor AC voltage regulator for various fields of its application”, in proc. *Fourteenth All-Russian (international) scientific and technical conference «Elektroenergetika. Energiya-2019 [Power industry. Energy 2019]»*, Apr. 2-4, 2019, Ivanovo, Russia. Ivanovo: Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin, 2019, vol. 3, pp. 30 (in Russian).
- [5] O.A. Amosova and A.E. Westphal'skyi, *Primenenie paketa Mathcad k resheniyu vychislitel'nyh zadach [Application of the Mathcad package to solving computational problems]*. Moscow: Publishing House MPEI, 2007 (in Russian).